

Pekka Rahkola

**BENSIINILISÄAINEEN VAIKUTUS HENKILÖAUTON
MOOTTORISSA**

BENSIINILISÄAINEEN VAIKUTUS HENKILÖAUTON MOOTTORISSA

Pekka Rahkola
Opinnäytetyö
syksy 2017
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu

Kone- ja tuotantotekniikan tutkinto-ohjelma, auto- ja kuljetustekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Pekka Rahkola

Opinnäytetyön nimi: Bensiinilisäaineen vaikutus henkilöauton moottorissa

Työn ohjaaja: Mauri Haataja

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2017 Sivumäärä: 39 + 0 liitettä

Tässä työssä tutkittiin erään bensiinilisäaineen vaikutusta moottorissa. Tutkitun lisäaineen tuoteselostuksessa kerrottiin aineen lisäävän moottorin suorituskykyä, vähentävän polttoaineen kulutusta ja pakokaasupäästöjä sekä laskevan pakokaasun lämpötilaa. Työn tavoitteena oli selvittää tuoteselostuksessa esitettyjen muutoksien todenmukaisuus mainittujen osa-alueiden näkökulmista moottorilaboratoriomittauksilla.

Tutkimustyön mittauksiin käytettiin Oulun ammattikorkeakoulun moottorilaboratoriossa olevaa Hyundain 1,6-litraista turboahdettua bensiinimoottoria. 98E5-bensiinillä mitattiin lisäainemittauksille vertailuarvot moottoria käytettäessä seitsemällä eri käyntinopeusalueella sekä eri kuormitusasteilla. Mittaukset toistettiin saman polttoaine-erän bensiineillä, joihin oli lisättyä bensiinilisäainetta kahdella seossuhteella. Motec ACL -tiedonkeruuyksikölle sekä Kistler keybox-järjestelmälle tallennetuista mittaustiedoista muodostettiin I2 Pro- ja Excel-ohjelmistoja käyttäen taulukoita ja kuvaajia, joita vertailtiin lisäaineettomalla bensiinillä mitattuihin vertailuarvoihin.

Mittaustuloksia vertaillessa huomattiin tuloksien eroavaisuuksien jäävän hyvin pieniksi. Luotettavampien tuloksien saamiseksi käytettyjen mittauslaitteiden tulisi olla uudempia sekä mittauksia tulisi suorittaa useita. Suoritettujen mittauksien perusteella bensiinilisäaine ei toteuttanut tuoteselostuksessa esitettyjä muutoksia. Koska tulokset olivat markkinoinnin kannalta negatiivisia, lisäaineen valmistaja pyysi julkaisemaan työ nimeämättä tutkittavaa tuotetta.

Asiasanat: polttomoottori, lisäaineet, suorituskyky, polttoainekulutus, pakokaasut

SISÄLLYS

| | |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ | 3 |
| SISÄLLYS | 4 |
| 1 JOHDANTO | 5 |
| 2 TUTKIMUKSESSA MITATTAVISTA SUUREISTA | 6 |
| 2.1 Moottorin tuottama teho | 6 |
| 2.2 Sylinterin painetilavuus-kuvaaja | 7 |
| 2.3 Ominaiskulutus | 8 |
| 2.4 Pakokaasupäästöt | 9 |
| 3 MITTAUSTEN SUORITTAMINEN | 11 |
| 3.1 Moottorin suorituskyvyn mittaaminen | 12 |
| 3.1.1 Suorituskyvyn mittaus moottorijarrulla | 12 |
| 3.1.2 Sylinteripaineiden mittaaminen Kistler-järjestelmällä | 12 |
| 3.2 Kuormituspistemittaukset | 13 |
| 3.2.1 Ominaiskulutuksen mittaaminen | 13 |
| 3.2.2 Pakokaasun lämpötilan mittaaminen | 13 |
| 3.2.3 Pakokaasupäästöjen mittaaminen | 13 |
| 4 MITTAUSTULOKSET | 14 |
| 4.1 Suorituskyvyn mittaus moottorijarrulla | 14 |
| 4.2 Suorituskyvyn mittaus Kistler-järjestelmällä | 18 |
| 4.3 Ominaiskulutus | 20 |
| 4.4 Pakokaasujen lämpötilat | 23 |
| 4.5 Pakokaasupäästöt | 26 |
| 5 YHTEENVETO | 32 |
| 6 POHDINTA | 34 |
| LÄHTEET | 38 |

1 JOHDANTO

Monen autotarvikkeisiin erikoistuneen liikkeen tuotevalikoimasta löytyy sekä bensiini- että dieselmootoreille tarkoitettuja polttomoottorilisäaineita, joiden tuotekuvauksissa esitetyt muutokset lisäainetta käytettäessä vaihtelevat. Tässä tutkimustyössä tutkitaan erään lisäaineen valmistajan ilmoittamien muutosten todenmukaisuus suorituskyvyn, ominaiskulutuksen, pakokaasun lämpötilojen ja pakokaasupäästöjen näkökulmista.

Tutkittava polttomoottorilisäaine on suunniteltu käytettäväksi bensiini- ja etanoli-käyttöisille moottoreille. Lisäaineen tuoteselostuksen tietojen mukaan lisäaineen käyttäminen pienentää bensiinimoottorin hiilivetypäästöjä, moottorin ominaiskulutusta ja pakokaasun lämpötiloja. Tuloksena olisi entistä puhtaampi palotapah-tuma, joka esimerkiksi karstoittaisi sytytystulppia ja venttiileitä vähemmän. Päi-vittäiseen käyttöön suositellaan 500 ml lisäainetta 350 litraan bensiiniä kohden ja kilpailukäyttöön 2 500 ml 300 litraa bensiiniä kohden. Kilpakäytössä käytössä lisäaineen kerrotaan lisäävän bensiinin oktaanilukua 4 yksiköllä, jolloin mootto-rista saataisiin parempi maksimisuorituskyky samoilla moottorin säädöillä (1).

Työn mittaukset on suoritettu Oulun ammattikorkeakoulun konetekniikan tiloissa sijaitsevassa moottorilaboratoriossa. Mittauksissa käytettiin moottorilaboratorion moottorijarruun kiinnitetty Hyundai 1,6 -litrainen turboahdettu suorasuihkuttei-nen bensiinimoottori. Moottori on varustettu tiedonkeruuyksiköllä, johon voidaan tallentaa moottorista käytön aikana erinäisiä mittaustuloksia, joita voidaan lukea ja käsitellä siihen suunnitellulla ohjelmistolla.

2 TUTKIMUKSESSA MITATTAVISTA SUUREISTA

Tässä luvussa on selitetty työssä käytetystä teoriasta ja mittauksissa tarvittavista matemaattisista kaavoista. Moottorin omilta ja siihen varustelluilta mittalaitteilta saadut mittaustiedot tallennettiin tiedonkeruuyksikölle, josta ne siirrettiin Motec I2 pro -ohjelmistolle. I2 pro -ohjelmisto mahdollisti esitettävien kaavojen käyttämisen mittaustietoihin, jotta niistä saatiin muodostettu mittaustulokset.

2.1 Moottorin tuottama teho

Moottorin tuottamasta vääntömomentista ja sen hetkisestä käyntinopeudesta voidaan laskea moottorin tuottama teho P (W) käyttäen kaavaa 1. Vääntömomentin ja käyntinopeuden vaikuttaessa tuotettuun tehoon voidaan tuotettua tehoa lisätä saavuttamalla enemmän vääntömomenttia tai lisäämällä moottorin käyntinopeutta sen kestävyysrajoissa. (2, s. 18.)

$$P = 2\pi * M * n$$

KAAVA 1

M = moottorin tuottama vääntömomentti (Nm)

n = moottorin pyörintänopeus (1/s)

Moottorin todellinen suorituskky määritetään käyttämällä kaavalla 2 laskettavaa SAE J1349 -standardin korjauskerrointa. Standardin tarkoituksena on tarjota menetelmä toistettavia mittauksia varten, jotta mittaistulokset vastaavat tarkasti moottorin todellista suorituskkyä mittaolosuhteiden mahdollisesti muuttuessa. Standardilla pyritään välttämään parhaan mahdollisen suorituskvyn mittaamisen moottorille parhaissa mahdollisissa olosuhteissa. Menetelmän korjauskertoimella muutetaan moottorista mitattu teho tai vääntömomentti vertailuolosuhteisiin vastaaviksi. Standardin vertailuolosuhteen ilmanpaineeksi on määritetty 100 kPa ja lämpötilaksi 25 °C. (3, s. 2.)

Kaavassa 2 on SAE J1349 korjauskertoimen määrityskaava (4)

$$cf = 1.180x \left[\left(\frac{990}{Pd} \right) x \left(\frac{Tc+273}{298} \right)^{0.5} \right] - 0.18$$

KAAVA 2

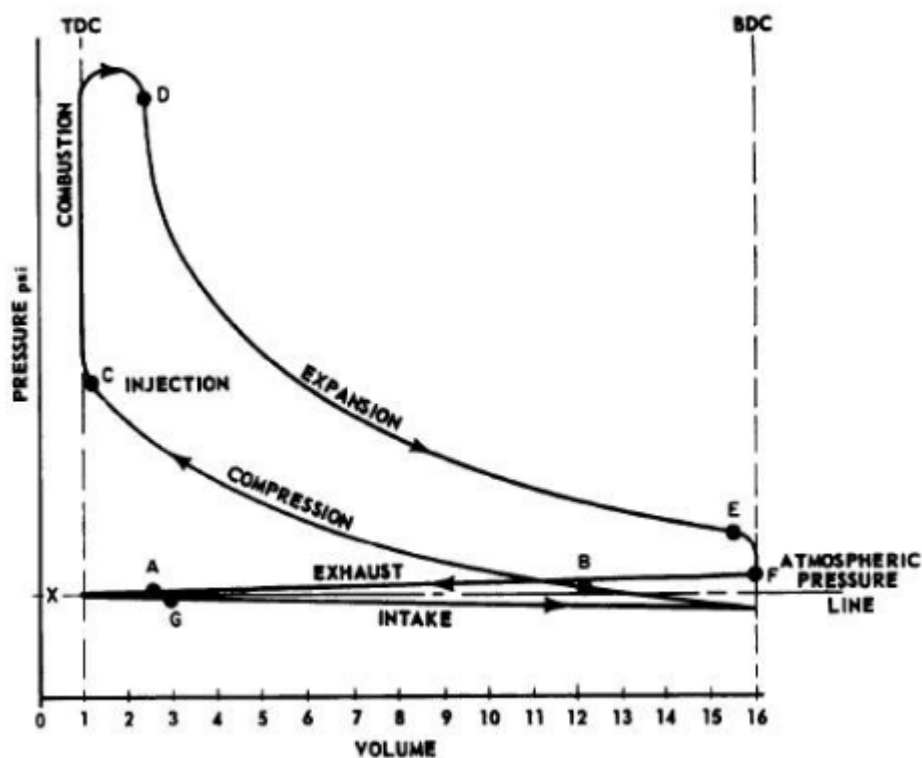
cf = korjauskerroin

Pd = kuivan ilman ilmanpaine (hPa)

Tc = ilman lämpötila (°C)

2.2 Sylinterin painetilavuus-kuvaaja

Moottorin sylinterissä työkierron aikana vallitsevaa kaasunpaine tietoa voidaan käyttää palokaasuista mäntään siirtyvän työn määrittämiseen. Tiedettäessä sylinterissä vallitseva paine ja vastaava sylinterin kokonaistilavuus yhden työkierron läpi, voidaan muodostaa kuvan 1 mallinen sylinterin painetilavuuskuvaaja. (5, s. 46.)



KUVA 1. Sylinterin painetilavuuskuvaaja (6)

Kuvaajassa pisteestä B työkierron mukaisesti myötäpäivään pisteeseen F rajoituvaa aluetta kutsutaan indikoiduksi työksi. Alue on mäntään kohdistuvaa työtä kuvaava alue. Pisteestä F työkierron mukaisesti vastapäivään pisteeseen B rajoituvaa aluetta kutsutaan kaasunvaihtotyöksi. Kaasunvaihtotyössä mäntä jou-

tuu tekemään työtä, mikäli sylinterissä vallitseva paine on poistotahdin aikana suurempi kuin imutahdin aikana. Tämä on tyypillistä vapaasti hengittäville moottoreille. Kaasunvaihtotyön aikana kaasu tuottaa mäntään työtä, mikäli poistotahdin aikana sylinterin paine on pienempi kuin imutahdin aikana, jolloin työkierron mukaisesti myös kaasuvaihtotyö kiertää myötäpäivään. Tämä on tyypillinen tilanne korkeasti kuormitetulle turboahdetulle moottorille. (5, s. 46–47.)

Koko työkierron aikana mäntään vaikuttavan paineen keskiarvoa kutsutaan indikoiduksi keskipaineeksi. Indikoitu keskipaine on indikoidun työn paineen ja kaasunvaihtotyön paineen keskiarvojen summa. Työkierron mukaan myötäpäivään rajautuvan alueen paineen keskiarvo on positiivinen eli mäntään työtä tuottavaa. Vastapäivään rajautuvan alueen paineen keskiarvo negatiivinen eli moottorista saatavaa työtä vähentävää. (2, s. 20.)

2.3 Ominaiskulutus

Mitattaessa moottorin polttoaineen kulutusta laboratoriossa ilmoitetaan kulutus yleensä polttoaineen ominaiskulutuksena be (g/kWh). Ominaiskulutus kuvastaa moottorin tuottamaa tehoa polttoaineen massavirtaa kohden. Luku kuvaa, kuinka hyvin moottori muuttaa sen käyttämän polttoaineen tuotetuksi tehoksi. (5, s. 51–52.)

$$be = \dot{m}_f / P$$

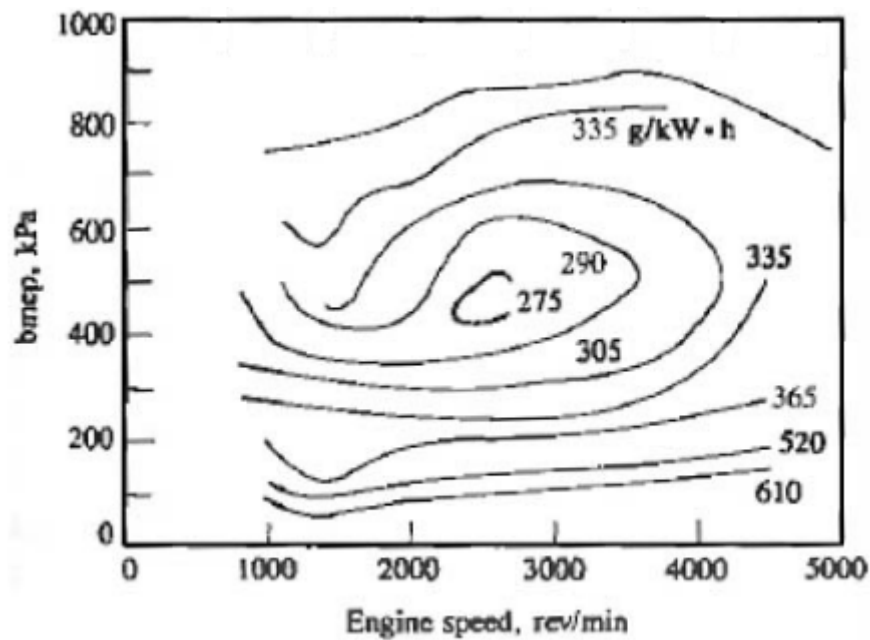
KAAVA 3

\dot{m}_f = polttoaineen massavirta (g/h)

P = moottorin tuottama teho (kW)

Pieni ominaiskulutus on siis moottorilta toivottava ominaisuus. Tyypillisesti paras ominaiskulutuksen arvo suorasuihkutteiselle bensiinimoottorille on 250 g/kWh ja ahdetulle dieselmoottorille 200 g/kWh. (2, s. 21.)

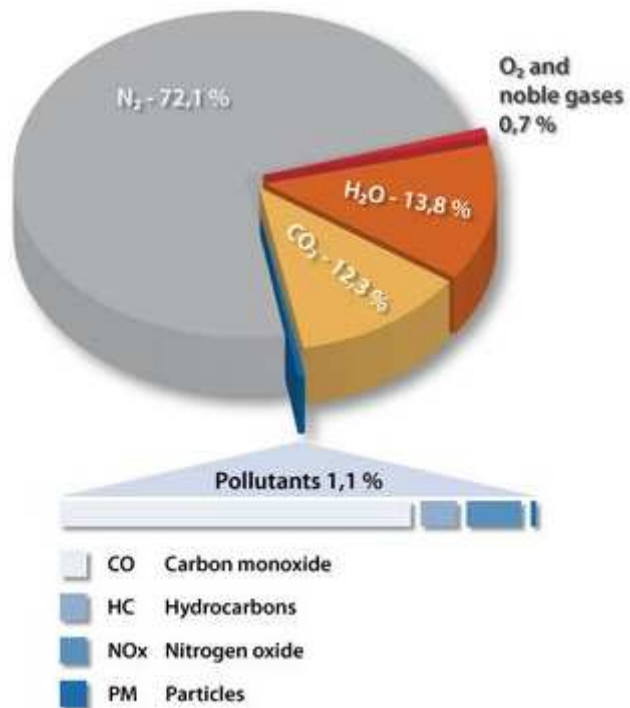
Koska ominaiskulutus muuttuu moottorin kuormituksen ja pyörintänopeuden mukaan, tulee ominaiskulutusta mitata useassa pisteessä. Ominaiskulutus pisteet voidaan rajata niiden suuruuden mukaan, jolloin ominaiskulutus pisteistä saadaan niin kutsu simpukkakuvaaja. (7, s. 28.) Kuvassa 2 on esitettynä erään bensiinimoottorin ominaiskulutuskuvaaja.



KUVA 2. Erään bensiinimoottorin ominaiskulutuskuvaja (8)

2.4 Pakokaasupäästöt

Pakokaasupäästöillä tarkoitetaan polttomoottorin palamisprosessin aikana syntyviä kaasumaisia palamistuotteita. Suurin osa polttomoottorin palamistuotteista on ihmiselle vaarattomia kuten typpeä (N_2), hiilidioksidia (CO_2) ja vesihöyryä (H_2O). Lisäksi syntyy ihmiselle haitallisia palamistuotteita kuten hiilimonoksidia (CO), Hiilivetyjä (HC) ja typenoksideja (NO_x). Kuten kuvassa 3 on esitetty, nykyaikaisten bensiinimoottorien palamistuotteista vain hyvin pieni osa noin 1,1 % on ihmiselle vaarallisia pakokaasu päästöjä (9).



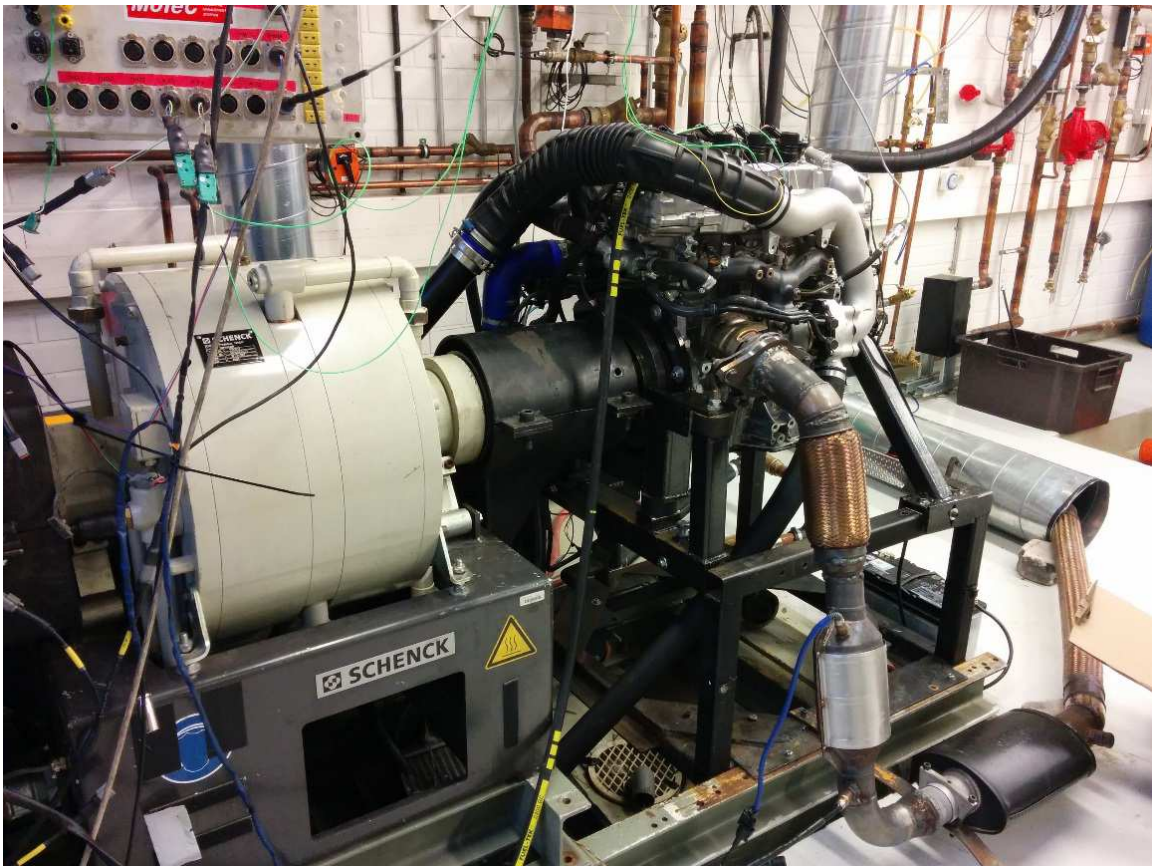
KUVA 3. Bensiinimoottorin pakokaasupäästökuvaaja (9)

Hiilivetypäästöt ja hiilimonoksidipäästöt ovat epätäydellisen palamisen tuotteita. Rikkaassa polttoaine ilmaseoksessa hapen puute johtaa molempien pakokaasupäästöjen nousemiseen. Laihassa polttoaine ilmaseoksessa pienentyneen liekinlämpötilan ja nopeamman palamisen myötä etenkin sylinterin seinämien lähellä johtaa hiilivetypäästöjen kasvamiseen. Liiallisen hapen vuoksi hiilimonoksidi päästöt hiukan vähenevät. (10, s. 411.)

3 MITTAUSTEN SUORITTAMINEN

Bensiinilisäaineen mittaukset suoritettiin 7. ja 8.3.2017 Oulun ammattikorkeakoulun moottorilaboratorion tiloissa. Mittauksissa keskityttiin neljään mittauskohteeseen: moottorin suorituskykyyn, polttoaineen kulutukseen, pakokaasun lämpötiloihin sekä pakokaasupäästöihin.

Mittauksissa käytettiin mittausantureilla varustettua Hyundai 1,6-litraista turboahdettua suorasuihkutteista bensiinimoottoria, joka oli kiinnitettynä Horiba Schenck WT380-2 -moottorijarruun (kuva 4). Moottorin ohjaukseen käytettiin Motec M150 -moottorinohjauslaitetta ja tiedon keräämiseen Motec ACL-tiedonkeruuyksikköä. Palopainemittauksessa ja nakutuksen havaitsemisessa käytettiin Kistler keybox -järjestelmää sekä erikoisvalmisteisia sytytystulppia. Mittaustietojen käsittelyyn sekä analysointiin käytettiin Excel- ja I2 pro-ohjelmistoa.



KUVA 4. Hyundai G4FJ-moottori kiinnitettynä Horiba-moottorijarruun

Huoltoasemalta haettu 60 litran 98E5-bensiinierä jaettiin määrällisesti kolmeen osaan: seostamattomaan bensiiniin, bensiiniin johon lisättiin 28 millilitraa lisääainetta sekä bensiiniin johon lisättiin 140 millilitraa lisääainetta. Ensimmäinen mittaustulos suoritettiin seostamattomalla bensiinillä, jonka mittaustuloksia käytettiin vertailutuloksina. Toisessa mittauksessa bensiiniin oli lisättyä 28 millilitraa bensiinilisäainetta. Kolmannessa mittauksessa bensiiniin oli lisättyä 140 millilitraa bensiinilisäainetta.

3.1 Moottorin suorituskyvyn mittaaminen

Moottorin suorituskykyä mitattiin kahdella eritavalla. Moottoria kuormitettiin Horiba-moottorijarrulla, joka mittasi moottorin tuottaman maksimi vääntömomentin valituissa mittapisteissä. Lisäksi mitattiin moottorin ensimmäisen sylinterin sylinteripaineita Kistler keybox -järjestelmällä 2 500 1/min käyntinopeudella moottorin maksimikuormituksella.

3.1.1 Suorituskyvyn mittaus moottorijarrulla

Moottorijarrulla kuormitettiin moottoria sen maksimikuormituksella mittauspisteiden ollessa 500 käyntinopeuden välein alkaen 1 500:sta ja päättyen 4 500:aan. Jokaisessa mittapisteessä moottoria kuormitettiin 30 sekunnin ajan, josta viimeisen viiden sekunnin mitattujen vääntömomenttien keskiarvoja käytettiin mittaustuloksiin. SAE J1349-standardin korjauskerrointa käyttäen mittaustuloksista saatiin vertailukelpoisia, koska kaava poisti ilmanpaineen sekä lämpötilan aiheuttaman muutoksen moottorin suorituskyvyssä. Kaavaan tarvittavat ilmanpaine ja lämpötila arvot mitattiin Vaisala PTB100C ja Vaisala HTM331-mittalaitteilla.

3.1.2 Sylinteripaineiden mittaaminen Kistler-järjestelmällä

Kistler keybox -järjestelmällä mitattiin ensimmäisen sylinterin sylinteripaineita, kun moottoria käytettiin maksimikuormituksella 2 500 1/min käyntinopeudella. Kistler-järjestelmä mittaa sylinterin paineen 0,1 kampiakselin pyörähdysasteen välein ja käyttää samalla pyörähdysastetietoa ja matemaattisia kaavoja sylinterin tilavuuden määrittämiseen. Jokaisessa suoritettussa mittauksessa moottorin ensimmäiseltä sylinteriltä tallennettiin yli 150 työkierron sylinteripainetiedot, joista valittiin 10 työkierron sarja. Valituista työkiirroista laskettiin sylinteripaineiden

keskiarvot saaden 7 200 painetulosta. Näistä painetuloksista ja sylinterin tilavuustiedoista saatiin Exceliä käyttäen muodostettua sylinterin painetilavuuskuvaajat.

3.2 Kuormituspistemittaukset

Mitatuista moottorin maksimikuormituspisteistä laskettiin 75 %, 50 % ja 25 % osakuormituspisteet. Kuormituspisteissä mitattiin polttoaineen ominaiskulutusta, pakokaasupäästöjä sekä pakokaasun maksimilämpötiloja. Jokaisessa kuormituspisteessä moottoria kuormitettiin 30 sekunnin ajan, mistä ominaiskulutuksen ja pakokaasupäästöjen tuloksiin käytettiin viimeisien viiden sekunnin keskiarvoja. Pakokaasujen lämpötilatuloksiin käytettiin viimeisien viiden sekunnin aikana saavutettuja maksimilämpötiloja.

3.2.1 Ominaiskulutuksen mittaaminen

Ominaiskulutus saatiin mitattua syöttämällä I2 pro -ohjelmistoon kaava 3, joka laski kaavalla 1 lasketusta tehosta ja polttoaineen massavirrasta polttoaineen ominaiskulutuksen. Tehon laskentaan tarvittava vääntömomentti ja käyntinopeus tiedot saatiin Horiba-moottorijarrulta. Polttoaineen massavirtaa mitattiin Rheonik RHM03 -mittalaitteella.

3.2.2 Pakokaasun lämpötilan mittaaminen

Moottorin pakosarjassa olevalla lämpötila-anturilla mitattiin pakokaasun lämpöarvoja kuormitusmittauksien aikana. I2 pro -ohjelmistoa käytettiin maksimilämpötilojen määrittämiseen.

3.2.3 Pakokaasupäästöjen mittaaminen

Pakokaasuista mitattiin moottorin hiilivety-, hiilimonoksidi- ja hiilidioksidipäästöjä eri kuormituspisteissä PPM-systems FTIR -pakokaasuanalysaattorilla. Moottorin pakoputkesta virtasi pakokaasua näyteletkua pitkin analysaattorille, joka ilmoitti pakokaasupäästöarvot tilavuusprosentteina. Pakokaasun virtauksesta analysaattorille johtuva aikaviive huomioitiin I2 pro -ohjelmistossa, jossa käytettiin timeshift-toimintoa, jotta päästöjen tulokset täsmäsivät moottorin käytön aikalinjan kanssa.

4 MITTAUSTULOKSET

Tässä luvussa esitellään mittauksien aikana saatuja mittaustuloksia taulukoissa ja kuvaajissa. Mittaustuloksien lisäksi taulukoissa vertaillaan bensiinilisäaineen vaikutusta ensimmäisen mittauksen vertailuarvoihin. Kuvaajissa esitetään mittaustuloksia graafisessa muodossa ja esitetään mittaustuloksien prosentuaalisia muutoksia vertailuarvoihin.

4.1 Suorituskyvyn mittaus moottorijarrulla

Moottorin tuottamaa vääntömomenttia mitattiin Horiba schenck -pyörrevirtajarrulla, jota hallittiin Horiba spark -hallintapaneelilla. Hallintapaneelilla määritettiin moottorille haluttu käyntinopeus sekä kuormitus. Hallintapaneeli ohjasi samanaikaisesti moottorin kaasupoljinta sekä moottorijarrun jarrutusmomenttia.

Moottorista mitattiin eri käyntinopeuksilla taulukossa 1 esitetyt maksimivääntömomenttiarvot ja kaavalla 1 lasketut maksimitehoarvot.

TAULUKKO 1. Ensimmäisen mittauksen suorituskykyarvot

| | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
| Vääntö (Nm) | 190,3 | 224,6 | 241,3 | 234,4 | 227,5 | 224,8 | 219,7 |
| Teho (kW) | 29,9 | 47,0 | 63,2 | 73,6 | 83,4 | 94,2 | 103,5 |

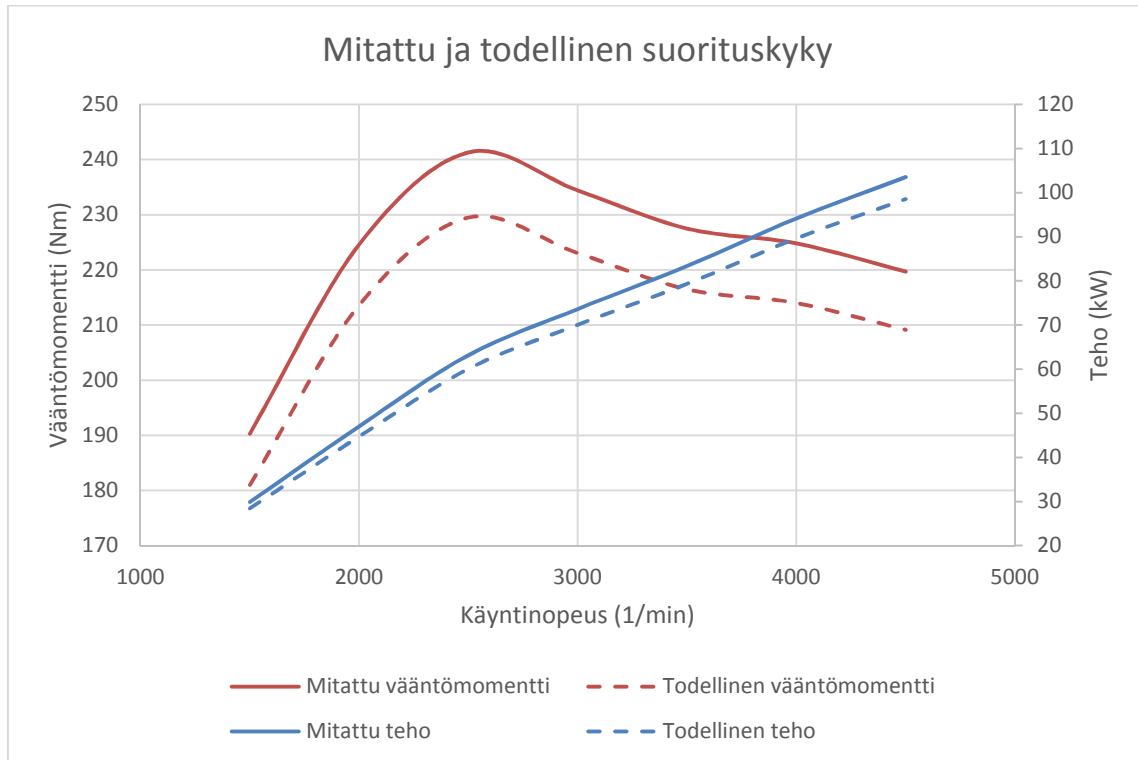
Jotta mittaustulokset olisivat vertailukelpoisia, täytyy mitattuihin suorituskykyarvoihin käyttää SAE 1349 -korjauskerrointa. Korjauskertoimella moottorin todelliseksi suorituskykyarvoiksi saatiin taulukossa 2 esitetyt arvot.

TAULUKKO 2. Moottorin todelliset suorituskykyarvot

| | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
| Vääntö (Nm) | 181,0 | 213,6 | 229,5 | 223,0 | 216,5 | 214,0 | 209,1 |
| Teho (kW) | 28,4 | 44,7 | 60,1 | 70,1 | 79,3 | 89,6 | 98,5 |

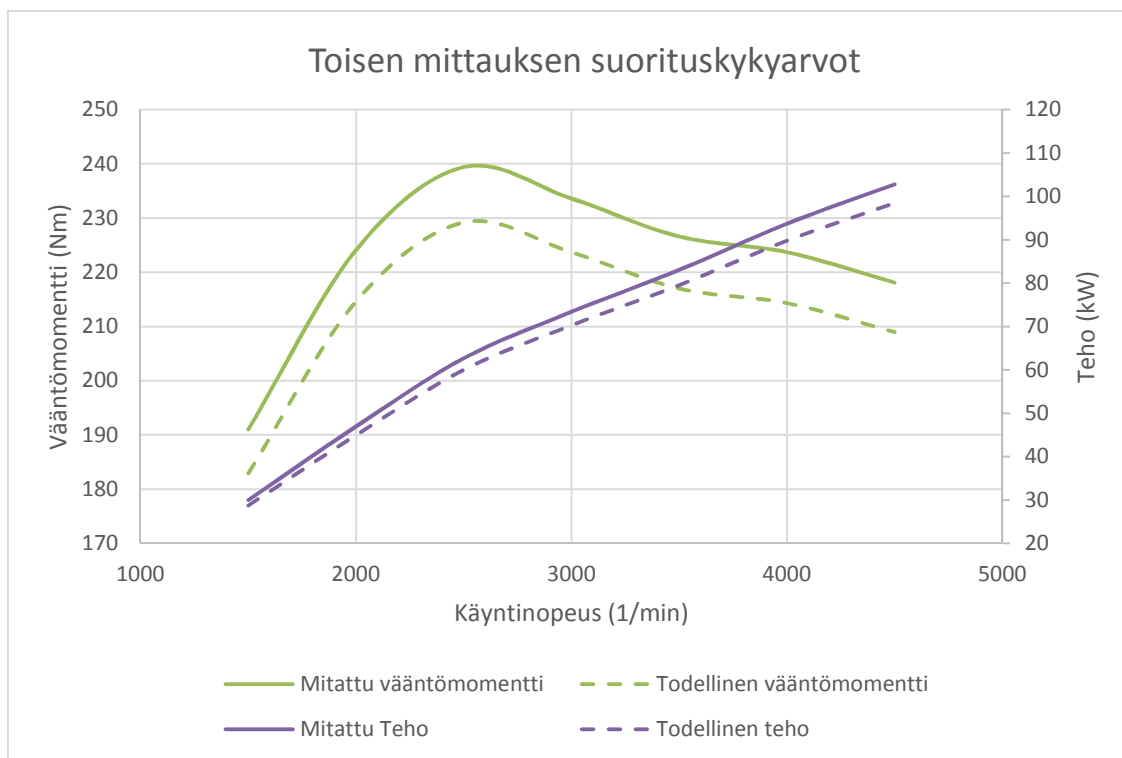
Kuvassa 5 on esitettynä mitatut suorituskykyarvot ja SAE J1349 -korjauskertoimella korjatut todelliset suorituskykyarvot graafisessa muodossa. Kuvasta voi todeta korjauskertoimesta aiheutuvan muutoksen vääntömomentis-

sa olevan samansuuruinen moottorin käyntinopeudesta riippumatta. Koska tehon laskentaan käytetään vääntömomenttia sekä käyntinopeutta, korjauskerroimen aiheuttama muutos suurenee käyntinopeuden kasvaessa.



KUVA 5. SAE J1349 -standardin korjauskerroimen vaikutus suorituskykyyn

Maksimikuormitusmittaus toistettiin toisessa mittauksessa, jossa 20 litraan 98E5-bensiini oli lisätty 28 ml bensiinilisäainetta. Kuvasta 6 voi havaita mitatun vääntömomentin jäävän hiukan pienemmäksi 2 500 1/min käyntinopeudella verrattuna ensimmäiseen mittaukseen. Muutos johtui todennäköisesti laboratorion lämpötilamuutoksesta mittauksien aikana. Vaisala HTM331 -mittalaitteelta saatujen lämpötilatietojen mukaan lämpötila oli noussut mittauksien aikana +24,3 °C:sta +26,9 asteeseen. Korjauskerroin ottaa huomioon mittausolosuhteiden lämpötilan sekä ilmanpaineen, joten taulukossa 3 esitettävät todelliset suorituskykyarvot ovat hyvin lähellä vertailumittauksen tuloksia.



KUVA 6. Toisen mittauksen suorituskyykyarvot

TAULUKKO 3. Toisen mittauksen todelliset suorituskyykyarvot

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Vääntö (Nm) | 182,9 | 214,6 | 229,2 | 223,7 | 217,0 | 214,3 | 209,0 |
| Teho (kW) | 28,7 | 44,9 | 60,0 | 70,3 | 79,5 | 89,8 | 98,5 |

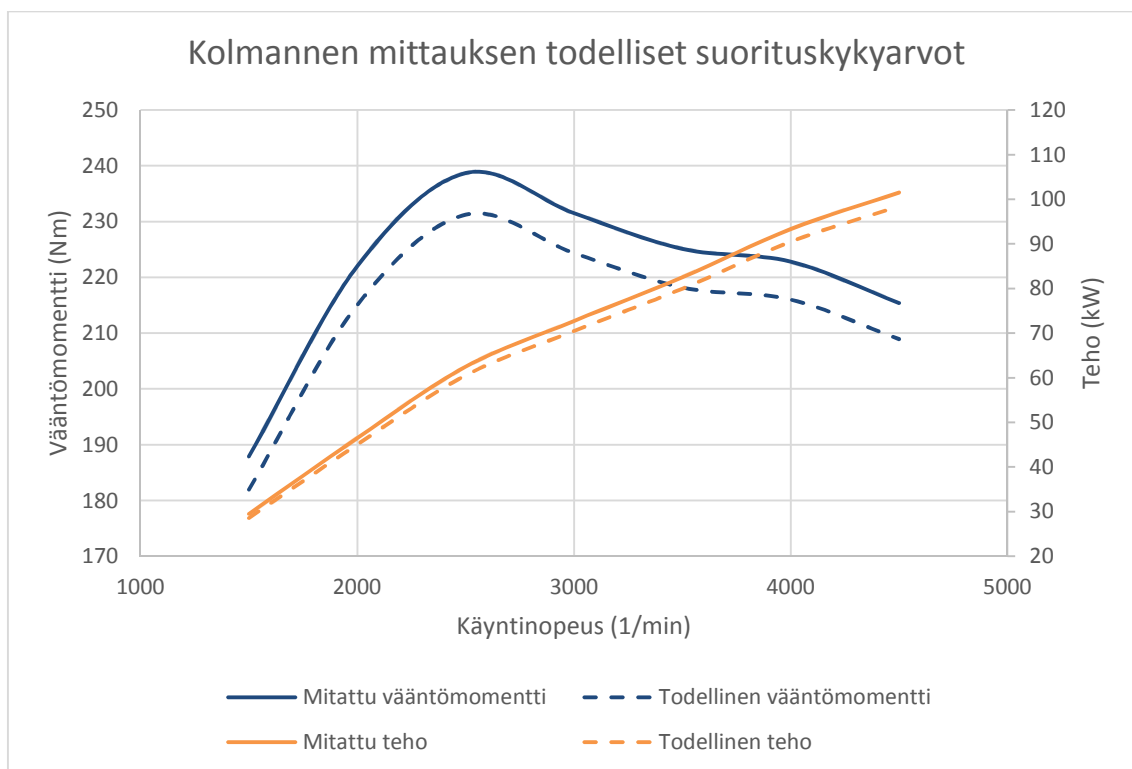
Taulukosta 4 havaitaan ensimmäisen mittauksen todellisiin suorituskyykyarvoihin verrattuna suurimman muutoksen olevan 1 500 1/min käyntinopeudella. Myöhemmin esitettävässä kuvassa 8 on esitettyä myös prosentuaaliset poikkeamat verrattuna vertailutuloksiin.

TAULUKKO 4. Toisen mittauksen muutos todellisessa suorituskyykyssä

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Muutos väännössä (Nm) | +1,9 | +1,0 | -0,3 | +0,7 | +0,5 | +0,3 | -0,2 |
| Muutos tehossa (kW) | +0,3 | +0,2 | -0,1 | +0,2 | +0,2 | +0,1 | -0,1 |

Kun bensiiniin oli lisätty 140 ml bensiinilisäainetta ja mittaus oli toistettu, todelliseksi suorituskyykyarvoiksi saatiin taulukossa 5 esitetyt arvot. Kuvasta 7 voidaan jälleen havaita maksimivääntömomentin pieneneminen 2 500 1/min käyntinopeudella, verrattaessa ensimmäiseen mittaukseen. Ensimmäisen ja kolmannen

mittauksen aikana laboratorion lämpötila oli Vaisala HTM331 -mittauslaitteen mukaan +24 celsiusastetta, joten lämpötila ei vaikuta suorituskky tuloksiin. Vaisala PTB100C -mittauslaitteen tuloksista huomattiin, että laboratoriossa vallitsevassa ilmanpaineessa oli tapahtunut 1,4 kilopascalin ilmanpaineen laske-
minen, joka vaikutti suorituskkyyn negatiivisesti. Koska korjauskerroin otti huomioon laboratoriossa vallitsevan ilmanpaineen, saatiin suorituskkytuloksista vertailukelpoisia keskenään.



KUVA 7. Kolmannen mittauksen suorituskkyarvot

TAULUKKO 5. Kolmannen mittauksen todelliset suorituskkyarvot

| | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
| Vääntö (Nm) | 182,0 | 215,1 | 231,2 | 224,4 | 218,2 | 216,0 | 208,9 |
| Teho (kW) | 28,6 | 45,0 | 60,5 | 70,5 | 80,0 | 90,5 | 98,5 |

Taulukosta 6 havaitaan vertailutuloksiin verrattuna suurimman muutoksen suorituskkyssä olevan 4 000 1/min käyntinopeudella.

TAULUKKO 6. Kolmannen mittauksen muutos todellisessa suorituskyvyssä

| | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
| Muutos väännössä (Nm) | +0,9 | +1,5 | +1,8 | +1,3 | +1,7 | +2,0 | -0,2 |
| Muutos tehossa (kW) | +0,1 | +0,3 | +0,5 | +0,4 | +0,6 | +0,8 | -0,1 |

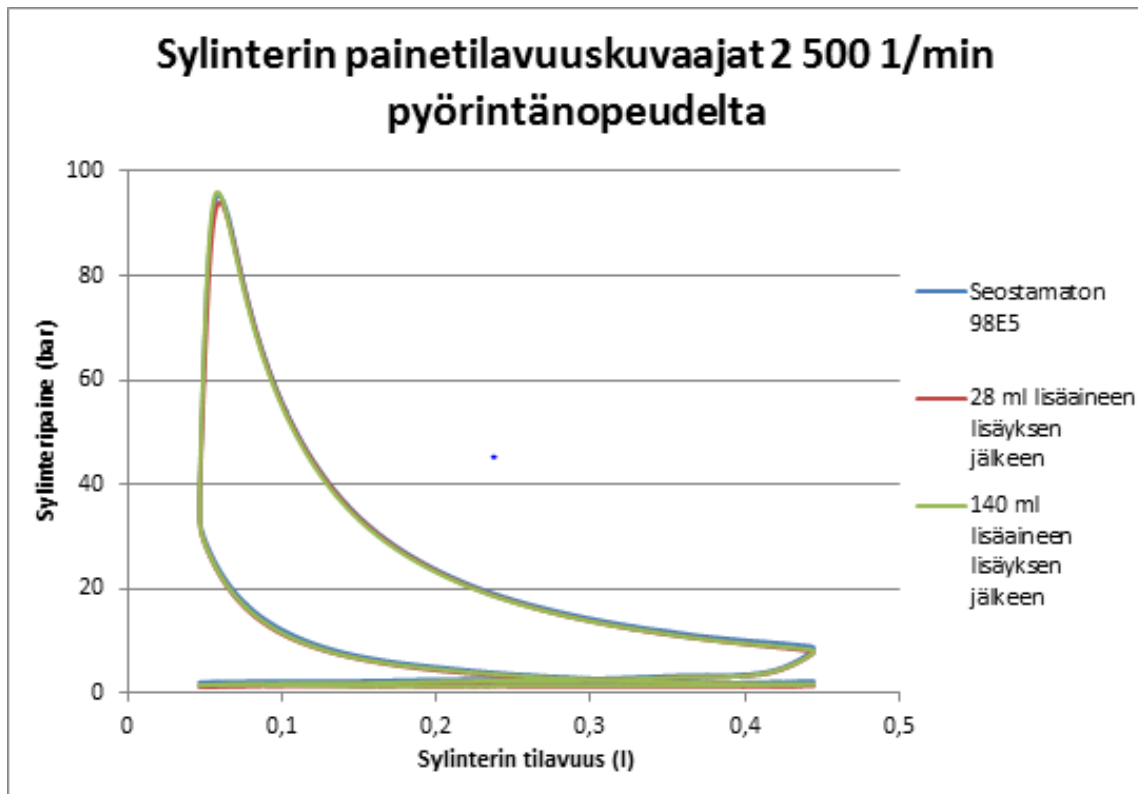
Kuvassa 8 on esitettyä toisen ja kolmannen mittauksen eroavaisuus vertailutulosiin prosentteina. Kuvasta voidaan havaita molempien todellisten suorituskykytuloksien suurimman eroavaisuuden olevan lähellä yhtä prosenttia.



KUVA 8. Todellisten suorituskykyarvojen eroavaisuus

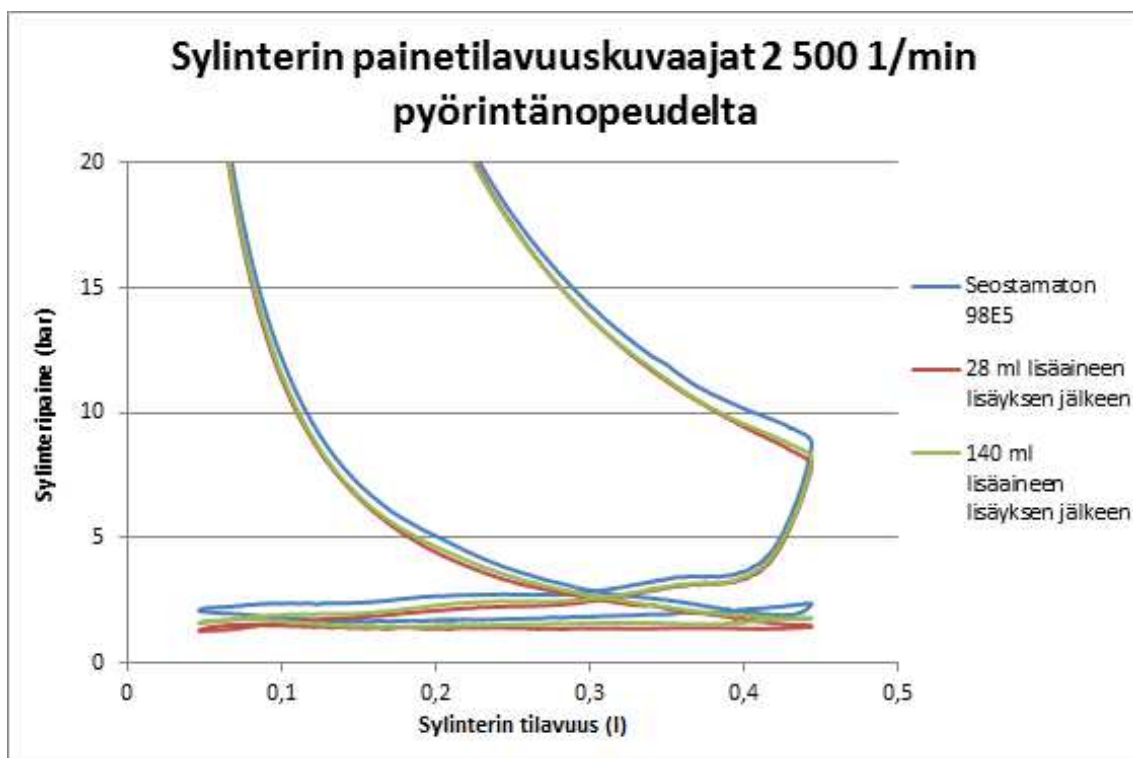
4.2 Suorituskyvyn mittaus Kistler-järjestelmällä

Kistler keybox -järjestelmällä mitatut 10 työkierron keskiarvoista muodostetut sylinterin painetilavuuskuvaajat on esitettyä kuvassa 9 ja 10. Kuvasta 9 nähdään mittaustulosten indikoitujen työosioiden olevan lähes identtisiä. Jotta moottorista saatava maksimisuorituskyky kasvaisi, pitäisi sylinterissä vallitsevan maksimipaineen nousta korkeammaksi tai vaikuttaa kauemmin.



KUVA 9. Sylinterin painetilavuuskuvaajat

Kuvasta 10 on havaittavissa kaasunvaihdon aikana hyvin pieniä muutoksia. Sylinterin täyttyminen polttoaineilla, joihin oli lisättyä bensiinilisäainetta, vaikuttaa jäävän alhaisemmaksi sylinterin alkaessa puristamaan ilmaa puristustahdin aikana. Tämä vaikutus on huomattavissa myös alhaisemmista sylinteripaineista sylinterin laskeutuessa työtahdin loppuvaiheessa. Sylinterin täytökseen vaikuttavat esimerkiksi tilamuutokset lämpötilassa ja vallitsevassa ilmanpaineessa.



KUVA 10. Zoomaus sylinterin painetilavuuskuvaajista

4.3 Oinaiskulutus

Lisäaineettomalla bensiinillä mitatuista maksimi vääntömomenttiarvoista laskettiin valituille mittauskäyntinopeuksille 75, 50 ja 25 prosentin osakuormituspisteet ovat esitettynä taulukossa 7. taulukossa. Esitettyjä kuormituspisteitä käytettiin kaikissa kolmessa mittauksessa.

TAULUKKO 7. Mitatut maksimivääntömomentit ja osakuormituspisteet

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Vääntömomentti (Nm) 100 % | 190,3 | 224,6 | 241,3 | 234,4 | 227,5 | 224,8 | 219,7 |
| Vääntömomentti (Nm) 75 % | 142,7 | 168,5 | 181,0 | 175,8 | 170,6 | 168,6 | 164,8 |
| Vääntömomentti (Nm) 50 % | 95,2 | 112,3 | 120,7 | 117,2 | 113,8 | 112,4 | 109,9 |
| Vääntömomentti (Nm) 25 % | 47,6 | 56,2 | 60,3 | 58,6 | 56,9 | 56,2 | 54,9 |

Kuormituspisteissä Rheonik RHM03 -virtausmittarilta saadun polttoaineen mas-savirrasta ja Horiba schenck -moottorijarrulla moottorilta mitatusta tehosta kaa-valla 2 lasketut polttoaineen ominaiskulutusarvot on esitettynä taulukossa 8.

TAULUKKO 8. Ensimmäisen mittauksen polttoaineen ominaiskulutusarvot

| | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
| Kulutus (g/kWh) 100 % kuormituksella | 265,2 | 343,8 | 314,9 | 293,7 | 293,1 | 292,1 | 298,1 |
| Kulutus (g/kWh) 75 % kuormituksella | 248,2 | 257,2 | 293,3 | 289,7 | 294,0 | 296,5 | 301,6 |
| Kulutus (g/kWh) 50 % kuormituksella | 260,3 | 251,0 | 253,2 | 255,4 | 277,9 | 306,0 | 311,7 |
| Kulutus (g/kWh) 25 % kuormituksella | 303,5 | 292,8 | 289,8 | 300,7 | 311,2 | 308,4 | 318,6 |

28 ml bensiinilisäaineen lisäyksen jälkeen, toisessa mittauksessa kuormituspiisteissä mitattiin taulukossa 9 esitetyt polttoaineen ominaiskulutusarvot.

TAULUKKO 9. Toisen mittauksen polttoaineen ominaiskulutusarvot

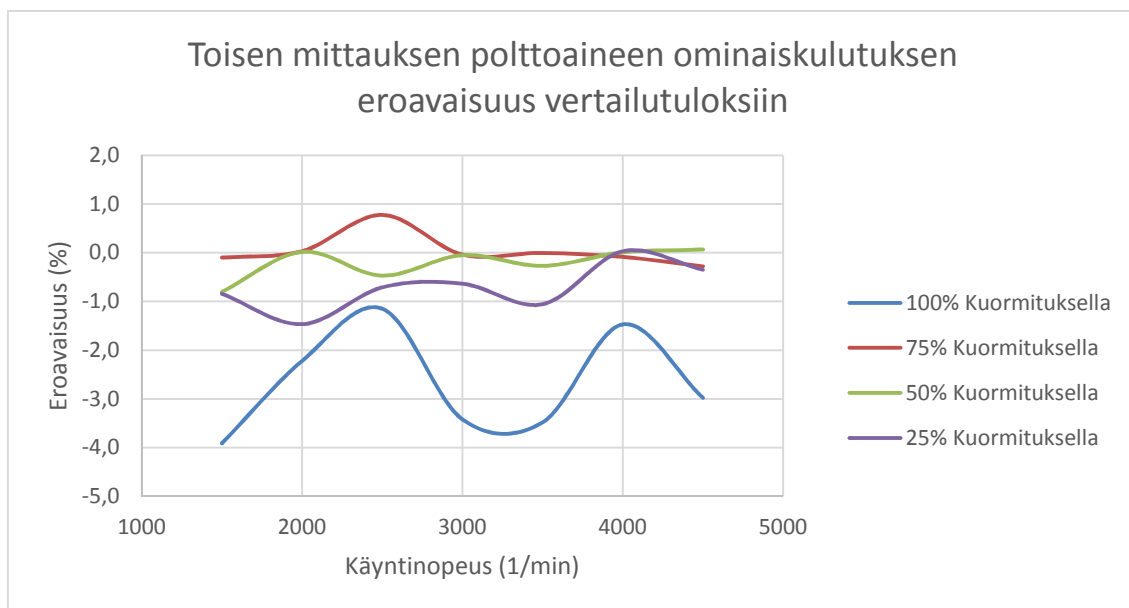
| | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
| Kulutus (g/kWh) 100 % kuormituksella | 261,3 | 341,6 | 313,7 | 290,3 | 289,6 | 290,7 | 295,1 |
| Kulutus (g/kWh) 75 % kuormituksella | 247,9 | 257,3 | 295,6 | 289,6 | 294,0 | 296,3 | 300,7 |
| Kulutus (g/kWh) 50 % kuormituksella | 258,2 | 251,1 | 252,0 | 255,3 | 277,2 | 306,1 | 311,9 |
| Kulutus (g/kWh) 25 % kuormituksella | 300,9 | 288,5 | 287,7 | 298,8 | 307,9 | 308,5 | 317,5 |

Muutos polttoaineen ominaiskulutuksessa verrattuna ensimmäiseen mittaukseen on esitetty taulukossa 10. Suurin 4,3 g/kWh ominaiskulutuksen laskeminen mitattiin 2 000 käyntinopeudella 25 % kuormituksella

TAULUKKO 10. Muutos polttoaineen ominaiskulutuksessa

| | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
| Muutos (g/kWh) 100 % | -3,9 | -2,2 | -1,1 | -3,4 | -3,5 | -1,5 | -3,0 |
| Muutos (g/kWh) 75 % | -0,3 | +0,1 | +2,3 | -0,1 | 0,0 | -0,3 | -0,8 |
| Muutos (g/kWh) 50 % | -2,1 | 0,0 | -1,2 | -0,1 | -0,8 | 0,0 | +0,2 |
| Muutos (g/kWh) 25 % | -2,6 | -4,3 | -2,1 | -1,9 | -3,3 | 0,1 | -1,1 |

Kuvassa 11 on esitettynä toisen mittauksen prosentuaaliset eroavaisuudet ensimmäiseen mittaukseen. Suurimmaksi havaittava neljän prosentin ominaiskulutuksen pieneneminen saavutettiin 1 500 1/min käyntinopeudella maksimikuormituksella. Pienemmillä moottorin kuormituksilla ei saavuteta yli prosentin eroavaisuutta.



KUVA 11. Eroavaisuus polttoaineen ominaiskulutuksessa prosentteina

140 ml lisäaineen lisäyksen jälkeen kolmannessa mittauksessa kuormituspisteissä mitattiin taulukossa 11 esitetyt polttoaineen ominaiskulutuksen arvot.

TAULUKKO 11. Kolmannen mittauksen polttoaineen ominaiskulutusarvot

| Pyörintänopeus (1/min) | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Kulutus (g/kWh) 100 % kuormituksella | 261,2 | 342,0 | 310,6 | 291,4 | 289,3 | 290,4 | 298,3 |
| Kulutus (g/kWh) 75 % kuormituksella | 247,2 | 254,1 | 292,8 | 288,3 | 293,3 | 294,7 | 299,4 |
| Kulutus (g/kWh) 50 % kuormituksella | 257,1 | 247,5 | 249,6 | 252,9 | 276,2 | 302,5 | 309,1 |
| Kulutus (g/kWh) 25 % kuormituksella | 296,1 | 285,7 | 285,1 | 292,4 | 304,4 | 304,1 | 313,9 |

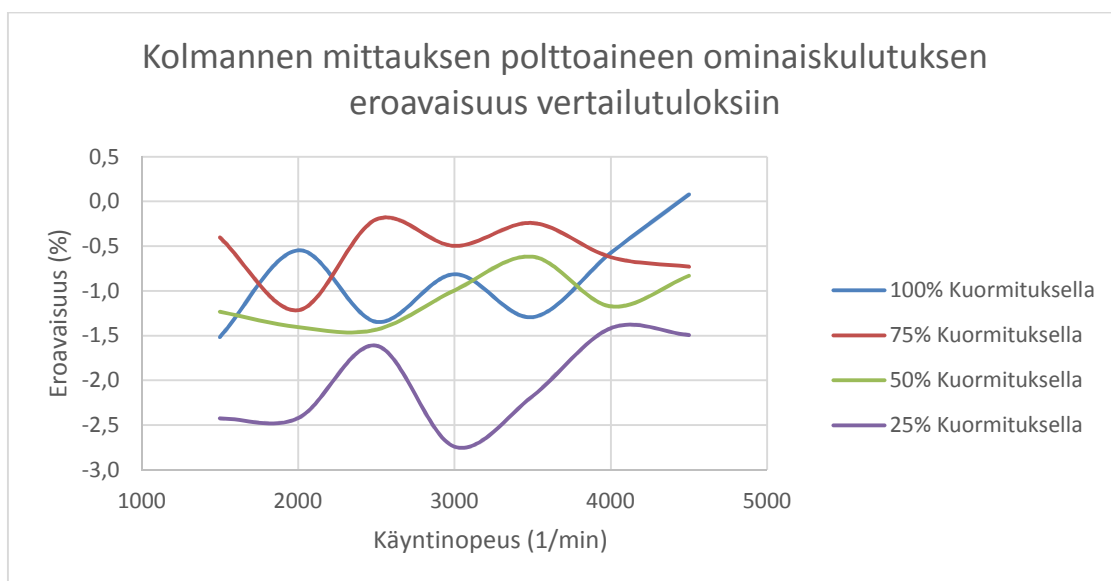
Muutos ominaiskulutuksessa verrattuna ensimmäisen mittauksen vertailuarvoihin on esitetty taulukossa 12. Suurin eroavaisuus on 8,2 g/kWh ominaiskulutuksen laskeminen, joka mitattiin 3 000 käyntinopeudella 25 % kuormituksella.

TAULUKKO 12. Muutos polttoaineen ominaiskulutuksessa

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Muutos (g/kWh) 100 % | -4,0 | -1,9 | -4,2 | -2,4 | -3,8 | -1,7 | 0,2 |
| Muutos (g/kWh) 75 % | -1 | -3,1 | -0,6 | -1,4 | -0,7 | -1,9 | -2,2 |
| Muutos (g/kWh) 50 % | -3,2 | -3,5 | -3,6 | -2,5 | -1,7 | -3,6 | -2,6 |
| Muutos (g/kWh) 25 % | -7,4 | -7,1 | -4,7 | -8,2 | -6,8 | -4,4 | -4,8 |

Kuvassa 12 on esitetty eroavaisuudet mittauspisteissä prosentuaalisena. Suurimmaksi havaittava 2,7 prosentin eroavaisuus mitattiin 3 000 1/min käynti-

nopeudella 25 prosentin osakuormituksella, muiden kuormitusasteiden suurimpien eroavaisuuksien ollessa alle 1,5 prosenttia.



KUVA 12. Eroavaisuus polttoaineen ominaiskulutuksessa prosentteina

4.4 Pakokaasujen lämpötilat

Moottorin pakosarjassa olevalla lämpötila-anturilla mitattiin kuormituspisteissä, 98E5 bensiiniä käytettäessä, taulukossa 13 esitetyt pakokaasun maksimilämpötila-arvot.

TAULUKKO 13. Ensimmäisen mittauksen pakokaasun maksimilämpötila-arvot

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Maksimilämpötila (°C) 100 % kuormituksella | 709,2 | 725,0 | 761,7 | 792,4 | 808,6 | 825,6 | 824,7 |
| Maksimilämpötila (°C) 75 % kuormituksella | 645,0 | 750,3 | 724,8 | 741,3 | 762,4 | 786,1 | 801,1 |
| Maksimilämpötila (°C) 50 % kuormituksella | 594,6 | 681,7 | 751,7 | 773,4 | 787,4 | 771,4 | 801,1 |
| Maksimilämpötila (°C) 25 % kuormituksella | 557,2 | 634,1 | 699,4 | 737,9 | 781,1 | 794,1 | 819,8 |

Kun bensiiniin lisättiin 28 ml lisäainetta, mitattiin kuormituspisteissä taulukossa 14 esitetyt pakokaasun maksimilämpötila-arvot.

TAULUKKO 14 Toisen mittauksen pakokaasun maksimilämpötila-arvot

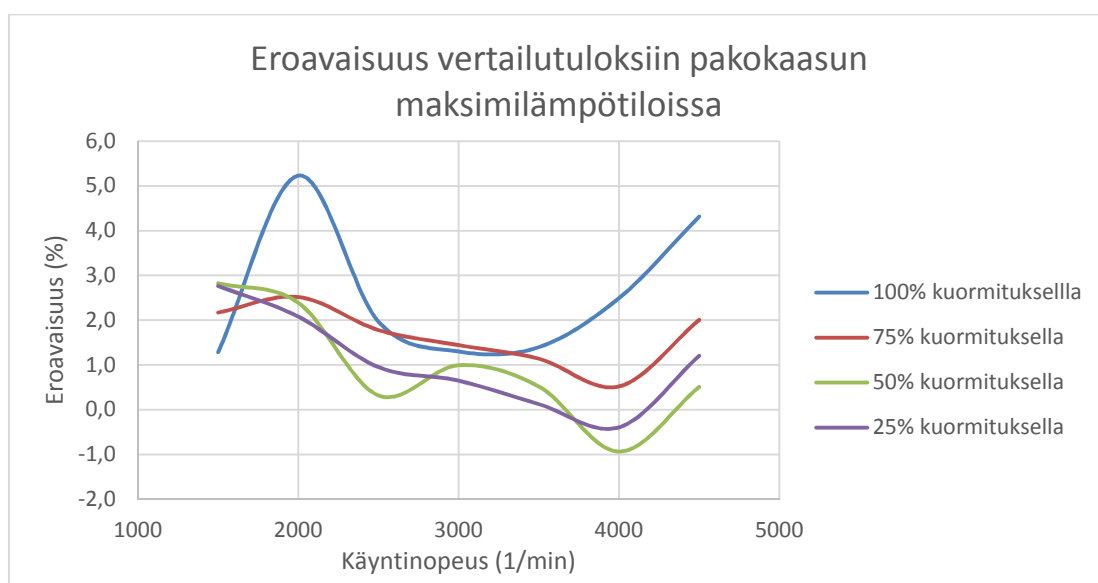
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Maksimilämpötila (°C) 100 % kuormituksella | 718,3 | 762,9 | 776,7 | 802,7 | 819,9 | 846,2 | 860,3 |
| Maksimilämpötila (°C) 75 % kuormituksella | 659,0 | 769,2 | 737,7 | 752,0 | 771,1 | 790,2 | 817,2 |
| Maksimilämpötila (°C) 50 % kuormituksella | 611,4 | 698,0 | 754,1 | 781,1 | 791,5 | 764,2 | 805,2 |
| Maksimilämpötila (°C) 25 % kuormituksella | 572,6 | 647,3 | 706,1 | 742,7 | 782,1 | 791,0 | 829,7 |

Muutos maksimilämpötiloissa mitattuihin vertailu mittauksen mittaustuloksiin on esitettyä taulukossa 15.

TAULUKKO 15 Muutos pakokaasun maksimilämpötila-arvoissa

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Muutos (°C) 100 % | +9,1 | +37,9 | +15 | +10,3 | +11,3 | +20,6 | +35,6 |
| Muutos (°C) 75 % | +14 | +18,9 | +12,9 | +10,7 | +8,7 | +4,1 | +16,1 |
| Muutos (°C) 50 % | +16,8 | +16,3 | +2,4 | +7,7 | +4,1 | -7,2 | +4,1 |
| Muutos (°C) 25 % | +15,4 | +13,2 | +6,7 | +4,8 | +1 | -3,1 | +9,9 |

Kuvasta 13 on havaittavissa suurimman maksimilämpötilan muutoksen olevan 2 000 1/min käyntinopeudella moottorin maksimikuormituksella, jolloin pakokaasujen maksimilämpötila nousi 5,2 prosenttia. Havaittavissa on myös hyvin pieniä maksimilämpötilojen laskeminen 25 ja 50 prosentin kuormituksella käyntinopeuden ollessa 4 000 1/min.



KUVA 13. Toisen mittauksen prosentuaaliset muutokset

Kun bensiiniin lisättiin 140 ml bensiinilisäainetta, kuormituspisteissä mitattiin pakokaasuille taulukossa 16 esitetyt maksimilämpötila-arvot.

TAULUKKO 16. Kolmannen mittauksen pakokaasun maksimilämpötila-arvot

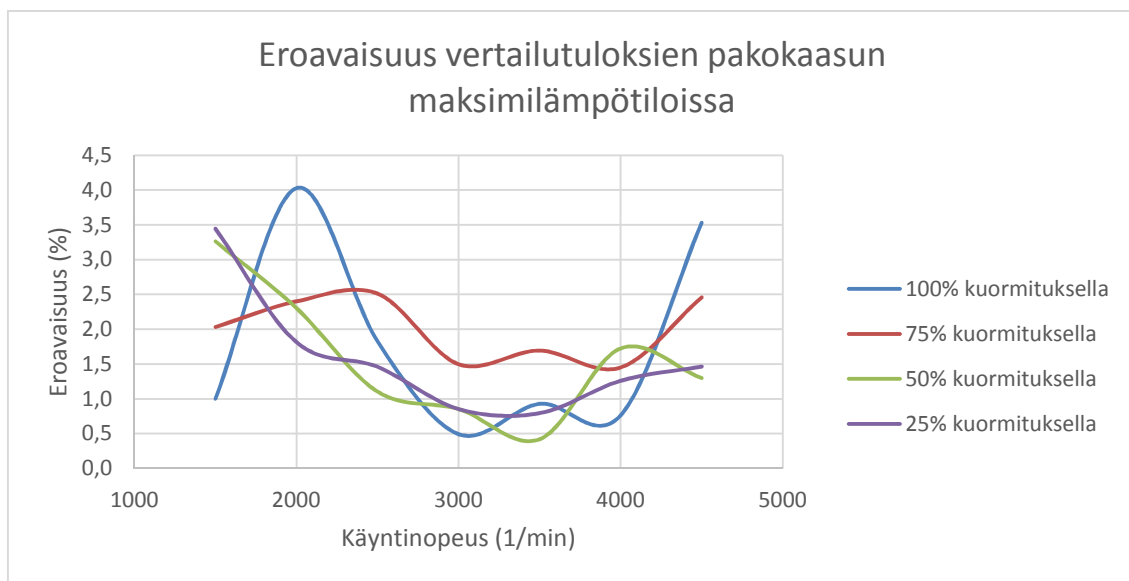
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Maksimilämpötila (°C) 100 % kuormituksella | 716,3 | 754,2 | 775,6 | 796,3 | 816,1 | 831,9 | 853,8 |
| Maksimilämpötila (°C) 75 % kuormituksella | 658,1 | 768,3 | 743,0 | 752,4 | 775,3 | 797,5 | 820,8 |
| Maksimilämpötila (°C) 50 % kuormituksella | 614,0 | 697,4 | 760,0 | 780,0 | 790,7 | 784,7 | 811,5 |
| Maksimilämpötila (°C) 25 % kuormituksella | 576,4 | 645,6 | 709,6 | 744,2 | 787,3 | 804,1 | 831,8 |

Muutos lämpötila-arvoissa mitattuihin vertailuarvoihin on esitetty taulukossa 17.

TAULUKKO 17. Muutos pakokaasun maksimilämpötila-arvoissa

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Muutos (°C) 100 % | +7,1 | +29,2 | +13,9 | +3,9 | +7,5 | +6,3 | +29,1 |
| Muutos (°C) 75 % | +13,1 | +18,0 | +18,2 | +11,1 | +12,9 | +11,4 | +19,7 |
| Muutos (°C) 50 % | +19,4 | +15,7 | +8,3 | +6,6 | +3,3 | +13,3 | +10,4 |
| Muutos (°C) 25 % | +19,2 | +11,5 | +10,2 | +6,3 | +6,2 | +10,0 | +12,0 |

Kuvassa 13 on esitettynä kolmannen mittauksen pakokaasunlämpötilojen prosentuaalinen eroavaisuus vertailumittauksen mittaustuloksiin. Suurin neljän prosentin maksimilämpötilan nousu on havaittavissa 2 000 1/min käyntinopeudella moottorin maksimikuormituksella. Kuvasta on myös havaittavissa, ettei pakokaasun maksimilämpötila-arvot laskeneet missään kuormituspisteessä verrattuna vertailumittauksen maksimilämpötila-arvoihin.



KUVA 13. Kolmannen mittauksen prosentuaaliset muutokset

4.5 Pakokaasupäästöt

Kuormituspisteissä mitattiin PPM-Systems FTIR -pakokaasupäästö-analysaattorilla taulukoissa 18–20 esitetyt hiilivety, hiilimonoksidi ja hiilidioksidi -päästöarvot, kun moottoria käytettiin seostamattomalla 98E5-bensiinillä. Lukuun ottamatta taulukossa 18 esitettyjä hiilivetypäästöjä, jotka ovat ilmoitettuna miljoonasosina, mittaustulokset ovat esitettynä tilavuusprosentteina.

TAULUKKO 18. Ensimmäisen mittauksen hiilivetypäästöt

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| HC päästöt (ppm) 100 % kuormituksella | 371 | 691 | 510 | 336 | 304 | 310 | 348 |
| HC päästöt (ppm) 75 % kuormituksella | 256 | 250 | 293 | 288 | 320 | 347 | 381 |
| HC päästöt (ppm) 50 % kuormituksella | 276 | 240 | 219 | 213 | 285 | 330 | 449 |
| HC päästöt (ppm) 25 % kuormituksella | 274 | 287 | 263 | 245 | 236 | 300 | 386 |

TAULUKKO 19. Ensimmäisen mittauksen hiilimonoksidipäästöt

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CO päästöt (%) 100 % kuormituksella | 1,7 | 6,6 | 6,5 | 6,3 | 6,2 | 6,2 | 6,1 |
| CO päästöt (%) 75 % kuormituksella | 1,4 | 1,2 | 6,3 | 6,3 | 6,3 | 6,3 | 6,3 |
| CO päästöt (%) 50 % kuormituksella | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 2,6 | 5,6 | 5,6 |
| CO päästöt (%) 25 % kuormituksella | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 1,2 | 1,3 | 1,0 | 0,9 |

TAULUKKO 20. Ensimmäisen mittauksen hiilidioksidipäästöt

| | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
| CO ₂ päästöt (%) 100 % kuormituksella | 13,2 | 9,8 | 10,5 | 11,3 | 11,4 | 11,5 | 11,5 |
| CO ₂ päästöt (%) 75 % kuormituksella | 14,0 | 14,0 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 |
| CO ₂ päästöt (%) 50 % kuormituksella | 14,2 | 14,2 | 14,2 | 14,2 | 13,5 | 11,8 | 11,7 |
| CO ₂ päästöt (%) 25 % kuormituksella | 14,1 | 14,2 | 14,3 | 14,0 | 14,1 | 14,3 | 14,4 |

Taulukoissa 21–26 esitetään toisen mittauksen mittaustulokset pakokaasupäästöistä, kun bensiiniin oli lisätty 28 ml lisäainetta sekä muutos seostamattomalla bensiinillä mitattuihin vertailuarvoihin. Taulukossa 21 esitetyt hiilivetypäästöt ja taulukossa 22 esitetyt hiilivetypäästöjen muutokset ovat ilmoitettuna miljoonasosina, muiden mittaustuloksien ollessa tilavuusprosentteina.

Taulukossa 21 on esitettynä toisen mittauksen aikana kuormituspisteissä mitatut hiilivetypäästöt.

TAULUKKO 21. Toisen mittauksen hiilivetypäästöt

| | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
| HC päästöt (ppm) 100 % kuormituksella | 410 | 805 | 545 | 359 | 365 | 407 | 443 |
| HC päästöt (ppm) 75 % kuormituksella | 301 | 366 | 348 | 322 | 338 | 425 | 462 |
| HC päästöt (ppm) 50 % kuormituksella | 322 | 310 | 260 | 246 | 326 | 444 | 416 |
| HC päästöt (ppm) 25 % kuormituksella | 322 | 349 | 298 | 300 | 284 | 293 | 331 |

Taulukossa 22 on esitettynä muutos toisen mittauksen hiilivetypäästöissä verrattuna ensimmäiseen mittaukseen. Taulukosta huomaa hiilivetypäästöjen nousseen lähes jokaisessa mittauspisteessä, suurimman muutoksen ollessa 2 000 1/min käyntinopeudella 75 prosentin kuormituksella 116 päästöhiukkasta miljoonassa hiukkasessa.

TAULUKKO 22. Muutos hiilivetypäästöissä

| | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
| Muutos (ppm) 100 % | +39 | +114 | +35 | +23 | +61 | +97 | +95 |
| Muutos (ppm) 75 % | +45 | +116 | +55 | +34 | +18 | +78 | +81 |
| Muutos (ppm) 50 % | +46 | +70 | +41 | +33 | +41 | +114 | -33 |
| Muutos (ppm) 25 % | +48 | +62 | +35 | +55 | +48 | -7 | -55 |

Taulukossa 23 on esitettynä toisen mittauksen aikana kuormituspisteissä mitatut hiilimonoksidipäästöt tilavuusprosentteina.

TAULUKKO 23. Toisen mittauksen hiilimonoksidipäästöt

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CO päästöt (%) 100 % kuormituksella | 1,6 | 6,5 | 6,3 | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 6,0 |
| CO päästöt (%) 75 % kuormituksella | 1,3 | 1,2 | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 6,2 |
| CO päästöt (%) 50 % kuormituksella | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 2,6 | 5,4 | 5,5 |
| CO päästöt (%) 25 % kuormituksella | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 0,9 | 0,8 |

Taulukossa 24 on esitetty toisen mittauksen hiilimonoksidipäästöjen muutos tilavuusprosentteina verrattuna ensimmäiseen mittaukseen. Taulukosta havaittavissa hiilimonoksidipäästöjen laskevan lähes jokaisessa mittauspisteessä, suurimman muutoksen ollessa 0,2 tilavuusprosenttia

TAULUKKO 24. Muutos hiilimonoksidipäästöissä

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Muutos (%) 100 % | -0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,2 | -0,1 | -0,1 | -0,1 |
| Muutos (%) 75 % | -0,1 | 0,0 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,1 |
| Muutos (%) 50 % | -0,1 | 0,0 | -0,1 | -0,1 | 0,0 | -0,2 | -0,1 |
| Muutos (%) 25 % | 0,0 | -0,1 | 0,0 | 0,0 | -0,1 | -0,1 | -0,1 |

Taulukossa 25 on esitetty toisen mittauksen aikana mitatut hiilidioksidi päästöt tilavuusprosentteina.

TAULUKKO 25 Toisen mittauksen hiilidioksidipäästöt

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CO ₂ päästöt (%) 100 % kuormituksella | 12,9 | 9,6 | 10,4 | 11,1 | 11,2 | 11,2 | 11,2 |
| CO ₂ päästöt (%) 75 % kuormituksella | 13,6 | 13,6 | 11,2 | 11,1 | 11,1 | 11,2 | 11,2 |
| CO ₂ päästöt (%) 50 % kuormituksella | 13,9 | 13,9 | 14,0 | 13,9 | 13,2 | 11,7 | 11,6 |
| CO ₂ päästöt (%) 25 % kuormituksella | 13,8 | 13,9 | 14,0 | 13,7 | 13,8 | 14,1 | 14,2 |

Taulukossa 26 on esitetty toisen mittauksen hiilidioksidipäästöjen muutos verrattuna vertailutuloksiin. Suurimmat eroavaisuudet löytyvät 1 500 ja 2 000 1/min käyntinopeuksilta 75 prosentin kuormitukselta, jossa hiilidioksidipäästöt laskivat 0,4 tilavuusprosenttia.

TAULUKKO 26. Muutos hiilidioksidipäästöissä

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Muutos (%) 100 % | -0,3 | -0,2 | -0,1 | -0,2 | -0,2 | -0,3 | -0,3 |
| Muutos (%) 75 % | -0,4 | -0,4 | -0,1 | -0,2 | -0,2 | -0,1 | -0,1 |
| Muutos (%) 50 % | -0,3 | -0,3 | -0,2 | -0,3 | -0,3 | -0,1 | -0,1 |
| Muutos (%) 25 % | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,2 | -0,2 |

Taulukoissa 27–32 esitetään mittatulokset pakokaasupäästöistä, kun bensiiniin oli lisätty 140 ml bensiinilisäainetta sekä muutos ensimmäisen mittauksen vertailuarvoihin. Taulukossa 27 esitettyjä hiilivetypäästöt ja taulukossa 28 esitetyt hiilivetypäästöjen muutokset ovat ilmoitettuna miljoonasosina, muiden mittaus- tuloksien ollessa tilavuusprosentteina.

Taulukossa 27 on esitettynä kolmannen mittauksen aikana kuormituspisteissä mitatut hiilivetypäästöt miljoonasosina.

TAULUKKO 27 Kolmannen mittauksen hiilivetypäästöt

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| HC päästöt (ppm) 100 % kuormituksella | 406 | 705 | 562 | 390 | 357 | 331 | 367 |
| HC päästöt (ppm) 75 % kuormituksella | 273 | 330 | 350 | 321 | 340 | 385 | 431 |
| HC päästöt (ppm) 50 % kuormituksella | 296 | 278 | 250 | 253 | 327 | 404 | 414 |
| HC päästöt (ppm) 25 % kuormituksella | 297 | 326 | 291 | 315 | 310 | 374 | 396 |

Taulukossa 28 on esitettynä kolmannen mittauksen hiilivetypäästöjen muutos verrattuna ensimmäisen mittauksen vertailutuloksiin. Suurin muutos mittaustuloksissa on 2 000 1/min käyntinopeudella ja 75 prosentin kuormituksella, jossa hiilivetypäästöt nousivat 80 ppm verran.

TAULUKKO 28. Muutos hiilivetypäästöissä

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Muutos (ppm) 100 % | +35 | +14 | +52 | +54 | +53 | +21 | +19 |
| Muutos (ppm) 75 % | +17 | +80 | +57 | +33 | +20 | +38 | +50 |
| Muutos (ppm) 50 % | +20 | +38 | +31 | +40 | +42 | +74 | -35 |
| Muutos (ppm) 25 % | +23 | +39 | +28 | +70 | +74 | +74 | +10 |

Taulukossa 29 on esitettynä kolmannen mittauksen hiilimonoksidi päästöt.

TAULUKKO 29. Kolmannen mittauksen hiilimonoksidipäästöt

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CO päästöt (%) 100 % kuormituksella | 1,7 | 6,5 | 6,4 | 6,2 | 6,1 | 6,1 | 6,0 |
| CO päästöt (%) 75 % kuormituksella | 1,3 | 1,2 | 6,3 | 6,2 | 6,2 | 6,2 | 6,2 |
| CO päästöt (%) 50 % kuormituksella | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 2,6 | 5,5 | 5,6 |
| CO päästöt (%) 25 % kuormituksella | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 0,9 | 0,9 |

Taulukossa 30 on esitettyä muutos hiilimonoksidipäästöissä verrattuna ensimmäisen mittauksen vertailutuloksiin. Useassa mittapisteessä hiilimonoksidipäästöt ovat laskeneet 0,1 tilavuusprosenttia.

TAULUKKO 30. Muutos hiilimonoksidipäästöissä

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Muutos (%) 100 % | 0,0 | -0,1 | -0,1 | -0,1 | -0,1 | -0,1 | -0,1 |
| Muutos (%) 75 % | -0,1 | 0,0 | 0,0 | -0,1 | -0,1 | -0,1 | -0,1 |
| Muutos (%) 50 % | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -0,1 | 0,0 |
| Muutos (%) 25 % | 0,0 | -0,1 | 0,0 | 0,0 | -0,1 | -0,1 | 0,0 |

Taulukossa 31 on esitettyä kolmannen mittauksen aikana mitatut hiilidioksidipäästöarvot tilavuusprosentteina.

TAULUKKO 31. Kolmannen mittauksen hiilidioksidipäästöt

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CO ₂ päästöt (%) 100 % kuormituksella | 13,0 | 9,9 | 10,5 | 11,1 | 11,3 | 11,4 | 11,4 |
| CO ₂ päästöt (%) 75 % kuormituksella | 13,9 | 13,9 | 11,3 | 11,4 | 11,3 | 11,3 | 11,3 |
| CO ₂ päästöt (%) 50 % kuormituksella | 14,1 | 14,1 | 14,1 | 14,2 | 13,4 | 11,8 | 11,7 |
| CO ₂ päästöt (%) 25 % kuormituksella | 14,1 | 14,2 | 14,2 | 14,0 | 14,0 | 14,3 | 14,4 |

Taulukossa 32 on esitettyä muutos hiilidioksidipäästöissä, verrattuna ensimmäisen mittauksen vertailutuloksiin. Suurimmat eroavaisuudet ovat 1 500 ja 3 000 1/min käyntinopeudella moottorin täydellä kuormituksella, jossa hiilidioksidipäästöarvot ovat vähentyneet 0,2 tilavuusprosenttia.

TAULUKKO 32 Muutos hiilidioksidipäästöissä

| Pyörintänopeus (1/min) | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 | 4 500 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Muutos (%) 100 % | -0,2 | +0,1 | 0,0 | -0,2 | -0,1 | -0,1 | -0,1 |
| Muutos (%) 75 % | -0,1 | -0,1 | 0,0 | +0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Muutos (%) 50 % | -0,1 | -0,1 | -0,1 | 0,0 | -0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Muutos (%) 25 % | 0,0 | 0,0 | -0,1 | 0,0 | -0,1 | 0,0 | 0,0 |

5 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin tuoteselostuksessa valmistajan ilmoittamien bensiinilisä-aineen käytöllä saavutettavien muutoksien todenmukaisuutta. Työ suoritettiin vertaamalla mittaustuloksia seostamattoman 98E5-bensiinin mittaustuloksia kahden samalla tavalla toistettujen mittauksien mittaustuloksiin, joissa bensiiniin oli lisättyä eri määrä bensiinilisäainetta. Mittauksissa tarkasteltiin muutoksia moottorin suorituskyvyn, polttoaineen kulutuksen, pakokaasun maksimilämpötilojen sekä pakokaasupäästöjen näkökulmista.

Suorituskykyä mitattaessa laboratorion olosuhteet vaihtelivat, mutta käyttäen SAE J1349-standardissa esitettyä kaavaa saatiin mittaustuloksista muutettu vertailukelpoisia todellisia suorituskykyarvoja. Tuloksista kävi ilmi suurimpien eroavaisuuksien olevan lähellä yhtä prosenttia. Myös Kistler-mittaukset osoittivat sylinterissä tapahtuvien palotapahtumien olevan hyvin samankaltaisia. Koska erot jäivät hyvin pieniksi, ei voida pois sulkea mittalaitteista syntyvien virheiden vaikutusta mittaustuloksiin.

Polttoaineen kulutusta mitattaessa mittaustulokset osoittivat kulutuksen pääsääntöisesti vähentyneen lisäaineen lisäämisen myötä. Suurimmaksi osaksi polttoaineen kulutus väheni 0,5–1,5 prosenttia, enimmillään vähentyen 4 prosenttia. Polttoaineen kulutuksen mittaukseen käytettiin tuloksien saamiseksi useaa mittalaitetta, jolloin mittalaitteista aiheutuvan virheen mahdollisuus moninkertaistuu. Polttoaineen massavirran mittaamiseen käytettiin coriolis-tyyppistä massavirtamittaria, jonka mittaustuloksiin aineen sekoittaminen bensiiniin saattoi vaikuttaa. Jotta kulutuksen vähentymisestä voitaisiin olla varmoja, tulisi mittauksissa käyttää hyvin tarkkaa painovaakaa kulutuksen mittaamiseen sekä tutkia polttoainejärjestelmän käyttöpaineita ja polttoainesuuttimien aukioloaikoja mittauksen aikana.

Pakokaasujen maksimilämpötiloja mitattaessa tuloksiksi saatiin vähäistä maksimilämpötilojen nousemista. Suurimmaksi maksimilämpötilan nousuksi mitattiin 37,9 °C, mutta prosentuaalisesti tämä on vain 5,2 prosenttia. Lämpötilojen nousuun vaikutti todennäköisesti kuormituspiste mittauksien välinen moottorin tyh-

jäkäyntiaika. Mittauksien aikana tallennetuista pakokaasun lämpötilatiedoissa oli huomattavissa useiden asteiden eroavaisuuksia juuri ennen kuormituspistemitauksien aloituksia. Tutkimustulosten parantamiseksi mittauksia tulisi toistaa useita kertoja pakokaasun lämpötilan ollessa lähes samassa lähtöarvossa mittauksen alkaessa.

Pakokaasupäästöjen mittaustuloksista huomaa hiilivetyarvojen kohoavan hie-
man samalla hiilimonoksidi- ja hiilidioksidiarvojen pääsääntöisesti laskiessa. Koska hiilivetypäästöt muodostuvat palamattomasta bensiinistä ja hiilimonoksi-
din ja hiilidioksidin ollessa palamistuotteita, voitaisiin mittaustuloksista todeta palotapahtumien huonontuneen. Tarkasteltavat pakokaasupäästömäärät ovat kuitenkin hyvin pieniä, kuten myös niissä tapahtuvat muutokset. Nykyisiin tutki-
muslaboratorioiden pakokaasupäästömittareihin verrattuna käytetty mittalaite oli vanha ja paljon käytetty. Mittavirheiden pienentämiseksi tulisi mittauksia tehdä useampia kertoja moderneilla pakokaasumittareilla, joiden mittaustulokset olisi-
vat tarkempia.

Käytetyissä mittalaitteissa syntyneitä virheitä pyrittiin vähentämään käyttämällä tuloksissa mitattujen arvojen keskiarvoja. Mittaustulokset koottiin taulukoihin sekä kuvaajiin, joissa mittaustuloksia verrattiin keskenään. Mittauksissa tarkas-
teltavien osa-alueiden tuloksien perusteella bensiinilisäaineen käytöstä aiheutu-
vat muutokset jäivät hyvin pieniksi, joten ei voida todeta lisäaineen vaikuttavan työssä tarkasteltuihin arvoihin valmistajan ilmoittamalla tavalla.

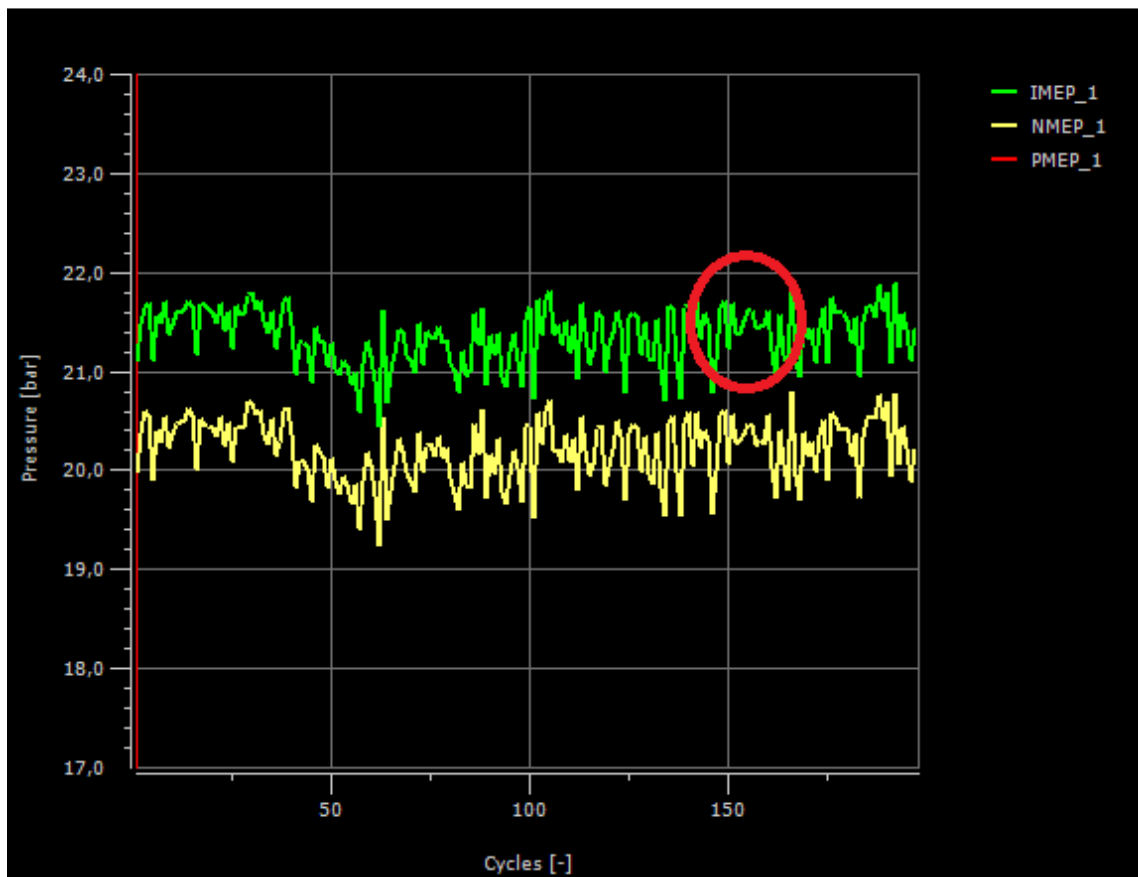
6 POHDINTA

Polttomoottori on polttoaineen sisältämällä lämpöenergialla toimiva lämpövoimakone. Ilman mekaanisten tai ohjelmallisten muutoksien tekemistä moottorille lisäsuorituskyvyn saavuttaminen vaatisi suurta energiamäärän muutosta polttoaineessa. Samaa muutosta tarvitaan, jotta saman määrän mekaanisen työn tekemiseen tarvittaisiin vähemmän polttoainetta. Boschin autotekniikan käsikirjan mukaan yksi kilo bensiiniä sisältää 41,2–41,9 megajoulea lämpöenergiaa (9, s. 316), josta noin kolmas osa saadaan hyödynnettyä kampiakselin pyörittämiseen. Yleisesti laskennassa polttoaineen ominaislämpökapasiteettina käytetään arvoa 42 MJ/kg. Jotta polttoaineen ominaislämpökapasiteettia saataisiin lisättyä 0,1 MJ/kg käyttäen 2 500 ml bensiinilisäainetta 350 litraan bensiiniä seossuhteella, täytyisi lisäaineen sisältää 56 MJ/kg lämpöenergiaa. Aineilla, jotka sisältävät lähes tarvittavan määrän lämpöenergiaa, esimerkiksi metaanilla, joka sisältää 50 MJ/kg lämpöenergiaa, on hyvin alhainen kiehumispiste. Metaanin kiehumispiste on -50 °C (10, s. 317). Ilman paineistusta metaani höyrystyisi kaasuksi, joten sitä ei voida lisätä ajoneuvon polttoainesäiliöön kuten käytettyä lisäainetta.

Pakokaasun lämpötila on riippuvainen moottoriin imutahdin aikana virtaavan ilman määrästä ja lämpötilasta, suihkutettavan polttoaineen sisältämästä lämpöenergiasta ja määrästä sekä moottorin mekaanisesta puristussuhteesta. Puristustahdin aikana puristettavan ilman lämpötila nousee paineen muutoksen mukaan. Sama lämpötilan muutos tapahtuu käänteisenä työtahdin aikana palotapahtuman päätyttyä. Koska moottori tuottaa työtä polttoaineen lämpöenergialla aikaan saamasta paineen äkillisestä noususta sylinterissä, tarkoittaisi pakokaasun lämpötilan laskeminen vähemmän tuotettua työtä tai nopeampaa palotapahtumaa, jos olosuhteiden oletetaan olevan vakiot. Mittaustietoja tarkastellessa kävi ilmi, että palotapahtumat olivat ajallisesti yhtä pitkiä

Kistler-mittauksissa ongelmaa tuotti samankaltaisten palotapahtumien löytäminen. Palotapahtumaan vaikuttaa hyvin paljon muuttujia, joten täsmälleen samanlaisia palotapahtumia ei esiinny. Tässä työssä tallennettiin jokaisen mittauksen yhteydessä yli sata palotapahtumaa moottorin ensimmäisestä sylinteris-

tä. Valittaessa 10 tuloksiin käytettävää palotapahtumaa kävi ilmi indikoitujen keskipaineiden suuri vaihtelevuus. Kuvassa 14 on kuvakaappaus Kistler-ohjelmasta, johon on lisätty punainen ympyrä osoittamaan mittaustuloksiin käytettävien kymmenen perättäisen palotapahtuman sijainti. Kuvasta näkee mittauksiin käytettävien palotapahtumien indikoitujen keskipaineiden eroavaisuuden. Kun jokaisessa mittauksessa on havaittavissa samankaltaisia eroavaisuuksia, ei odotettavissa ollut tuloksissa esitettyjä lähes identtisiä palopaine kuvaajia.

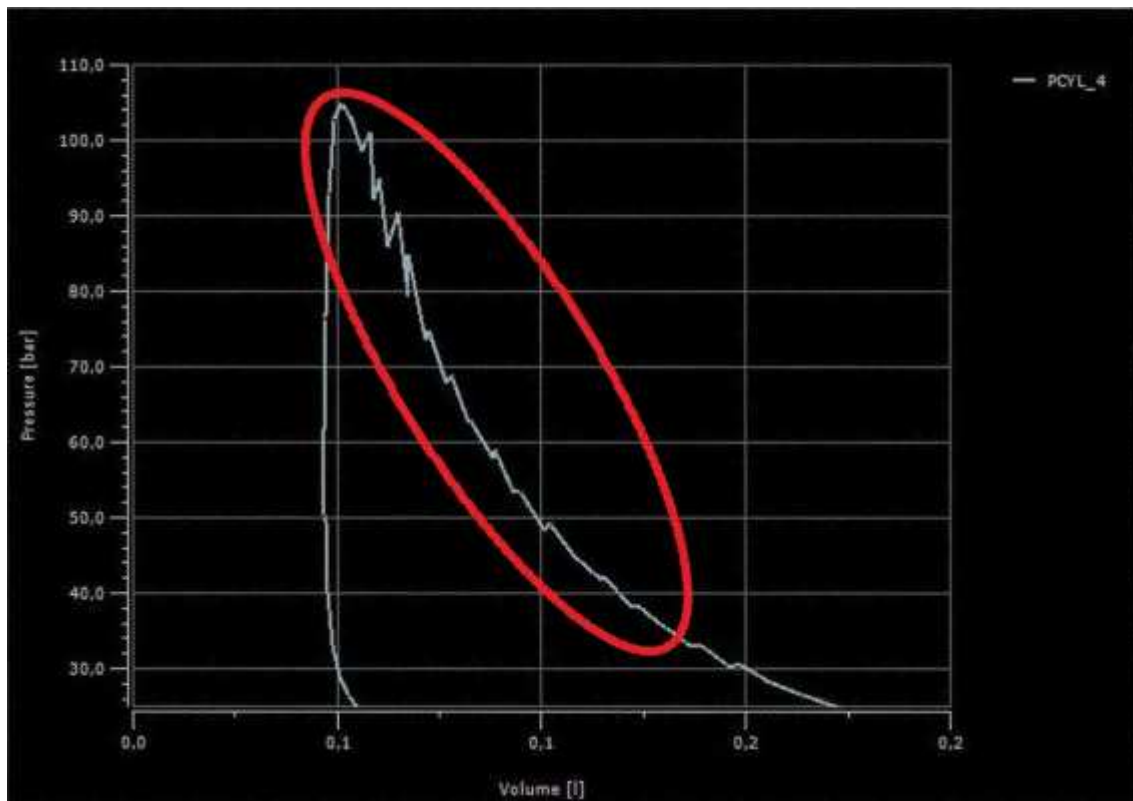


KUVA 14. Kuvakaappaus Kistler-ohjelmasta

Kistler-järjestelmältä ACL-tiedonkeruuyksikölle tallennetuista sylintereiden indikoituista keskipaineista, saatiin I2 pro -ohjelmistoa käyttäen laskettua indikoitujen keskipaineiden keskiarvot. Käytettäessä moottoria maksimikuormituksella suurin eroavaisuus oli 0,2 baaria, joka kyseisessä mittauspisteessä tarkoitti 1,2 prosentin eroavaisuutta. Olosuhteiden vaikutuksen ja hyvin pienen eroavaisuuden myötä voidaan todeta, ettei lisäaine vaikuttanut sylintereissä tapahtuviin palotapahtumiin lähes ollenkaan.

Lisäaineen valmistaja lupaa lisäainetta käytettäessä polttoaineen oktaaniluvun nousevan ja näin saataisiin moottorin suorituskykyä kasvatettua. Todellisuudessa polttoaineen oktaaniluku kuvastaa polttoaineen herkkyyttä itsesyttymiselle eli nakuttamiselle. Mitä suurempi on oktaaniluku, sitä pienempi on polttoaineen nakutusherkkyys (11, s. 302). Nakutusherkkyden ollessa pienempi voidaan polttoaineseoksen sytytysennakkoa lisätä ja ajoittaa palotapahtuman maksimipaine optimaaliselle alueelle. Näin saadaan esimerkiksi korkealla puristussuhteella toimivasta moottorista enemmän suorituskykyä. Lisääntyneen suorituskyvyn saavuttaminen vaatii kuitenkin aina moottorin säätämistä, sillä ilman säätämistä moottorin suorituskyky pysyy ennallaan, kuten tässä työssä tapahtui.

Mittauksien aikana havaittiin moottorin nakutuksen kasvaneen. Tarkasteltaessa nakutusarvoja kävi kuitenkin ilmi, että nakutuksen keskipainearvot olivat jokaisella mittaukerralla lähellä toisiaan. Lisäainetta käytettäessä nakutuksesta syntyneet äkilliset paineen nousut olivat kuitenkin arvoiltaan keskimäärin suurempia. Syytä nakutuksen kasvuun on vaikea arvioida. Kuvassa 15 esitetystä palotapahtumassa esiintyi nakutuksesta johtuvia äkillisiä sylinteripaineen muutoksia. Seostamatonta 98E5-bensiiniä käytettäessä painemuutokset olivat 2 baarin luokkaa, kun lisäaineen käytön aikana suurin tallentunut paineen muutos oli 7 baaria.



KUVA15. Palotapahtuman hallitsematon palaminen neljännessä sylinterissä

Yleisesti myytäviin polttoaineen lisäaineisiin kannattaa mielestäni suhtautua kriittisesti. Esimerkiksi tässä työssä tutkittua lisäainetta lisätään polttoaineeseen hyvin vähän suhteessa polttoaineen määrään. Jos valmistajan ilmoittama kilpailukäyttöön tarkoitettu polttoaineseos sisältää vain 0,7 prosenttia lisäainetta, on epäselvää, voidaanko seoksen käytöllä odottaa suuria muutoksia moottorin käytössä. Mikäli tällainen ihmeitä tekevä aine olisi olemassa, lienee selvää, että suuret polttoainejalostajat jo sitä käyttäisivät.

LÄHTEET

1. Tuoteselostuksen tiedot on salattu työn tilaajan pyynnöstä.
2. Spicher, Ulrich. 2002. Characteristics. Teoksessa Internal combustion engine handbook. 2002. SAE international. S. 18–21.
3. SAE J1349.2004. Surface vehicle standard. Engine test code-Spark ignition and compression ignition-Net power rating. Society of Automotive Engineers, inc.
4. Ilomäki, Janne 2017. 5K00BJ23 Moottorilaboratoriomittaukset 3 op. Opintojakson luennot keväällä 2017. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
5. Heywood, John B. 1988. Internal combustion engine fundamentals. USA: McGraw-Hill book Co.
6. Actual Combustion Cycles. Integrated Publishing. Saatavissa: <http://www.tpub.com/engine3/en3-15.htm> . Hakupäivä 11.8.2017.
7. Wolters, Peter – Haake, Bernd 2002. Maps. Teoksessa Internal combustion engine handbook. 2002. SAE international. S. 28.
8. Fundamentals of Fuel Consumption. 2017. National Academy of Sciences. Saatavissa: <https://www.nap.edu/read/12924/chapter/4#14>. Hakupäivä 11.8.2017.
9. Exhaust and harmful emissions. 2017. NGK spark plugs europe GmbH. Saatavissa: <https://www.ngk.de/en/technology-in-detail/lambda-sensors/basic-exhaust-principles/exhaust-and-harmful-emissions/>. Hakupäivä 16.8.2017.
10. Oelschlegel, Heijo – Koch, Thomas – Binder, Klaus – Scharrer, Otmar. 2014. Internal-combustion engines. Teoksessa Automotive Handbook. 2014. Kokoelmateoksen 9. versio. Karlsruhe, Saksa: Robert Bosch GmbH. S. 441

11. Dornhöfer, Gerd. Operating fluids. 2014. Teoksessa Automotive Handbook. 2014. Kokoelmateoksen 9. versio. Karlsruhe, Saksa: Robert Bosch GmbH. S. 302.